

6  
A-25  
АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР  
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

В. С. СКРЯБИНСКИЙ

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ  
В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ  
И ПРИ ИСКАЖЕННОЙ ФОРМЕ КРИВОЙ  
(Теория, конструирование, расчет)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Научный руководитель — чл.-корр. АН УССР, доктор технических наук,  
профессор НЕСТЕРЕНКО А. Д.

КИЕВ—1965

6  
A25

Рост энерговооруженности народного хозяйства ставит перед электроизмерительной техникой все более сложные задачи, выполнение которых сопряжено с большой затратой времени и средств. Так, если до недавнего времени основные потребности промышленности и научно-исследовательских организаций в электроизмерительных приборах можно было удовлетворить массовым выпуском приборов довольно ограниченной номенклатуры, то сейчас явно намечается необходимость в значительном расширении типажа электроизмерительных приборов и усложнении их при одновременном расширении производства новых типов.

Проблемами, возникшими в последнее время, являются: расширение частотного диапазона, измерения при искаженной форме кривой и уменьшение собственного потребления. Это объясняется широким внедрением установок повышенной частоты для нагрева, термообработки и плавки металлов, применением электропривода переменного тока повышенной частоты, что ведет к значительному сокращению габаритов и веса аппаратуры, а также позволяет увеличить скорости вращения роторов двигателей. При этом используются частоты как фиксированные, так и изменяющиеся в широком диапазоне.

Необходимость измерений в цепях с искаженной формой кривой тока или напряжения диктуется тем, что в последнее время значительно увеличивается удельный вес потребителей, создающих нелинейную нагрузку: электротяга постоянного тока на железнодорожном транспорте, что связано с необходимостью включения выпрямителей значительной мощности, установки электролизного производства и т. д.

Особо стоит вопрос об измерениях в линиях электропередачи постоянного тока, так как мощные инверторы и выпрямители создают весьма значительные искажения формы кривых тока и напряжения, что ведет к возрастанию погрешностей измерений. Особенно большие погрешности возникают при измерении

308676

Центральная научная  
БИБЛИОТЕКА

Академия наук Киргизской ССР

энергии, т. к. получившие широкое распространение индукционные счетчики имеют значительную зависимость показаний от формы кривой.

Решению проблемы расширения частотного диапазона измерительных приборов посвящены работы А. Я. Безикович, Д. И. Зорина, М. С. Каяндер, В. Н. Мильштейна, М. А. Огорелина и ряда других авторов. На основе проведенных упомянутыми авторами исследований оказалось возможным значительно улучшить технические характеристики выпускаемых промышленностью приборов. Верхняя граница рабочего диапазона частот выпускающихся приборов класса точности 0,5 и выше простирается до 1,5—2 кгц, что, в свое время, явилась большим достижением, однако, не может считаться достаточным в настоящее время. Вторым недостатком выпускающихся промышленностью измерительных приборов является значительная мощность, потребляемая ими из измерительной цепи. Эта мощность для приборов высоких классов точности (0,5 и выше) достигает десятков вольтампер и, как показано в работах М. С. Каяндер, В. Н. Мильштейна и М. А. Огорелина, значительно увеличивается при попытке дальнейшего расширения частотного диапазона.

В связи с вышеизложенным становится ясной необходимость дальнейших исследований, направленных на расширение частотного диапазона, на уменьшение собственного потребления мощности и на повышение точности измерительных приборов электромеханической группы. Решению этой задачи и посвящена реферируемая диссертационная работа.

Ниже приводится основной материал реферируемой работы.

## Глава I

### Обзор электроизмерительных приборов различных систем с точки зрения применимости их для измерений при повышенных частотах

С целью выяснения возможности и целесообразности применения измерительных приборов различных систем, для решения поставленной задачи, в работе приводится подробный анализ свойств приборов электромагнитной, электродинамической, электростатической, тепловой, термоэлектрической, индукционной, выпрямительной, электронной систем.

Показано, что приборы термоэлектрической системы, несмотря на всю заманчивость их использования не могут быть выполнены в классе точности 1,0 и выше вследствие ряда недостат-

ков. К этим недостаткам относятся, в первую очередь, исключительно низкая перегрузочная способность, нестабильность показаний, зависимость показаний от температуры окружающей среды. То же самое относится и к приборам тепловой системы.

Поскольку приборы электростатической системы весьма подробно рассмотрены в работах С. М. Пигина, то в реферируемой диссертации обращено внимание только на специфические вопросы применения этих приборов. К этим вопросам относятся: методика расчета емкостного делителя напряжения с учетом класса точности, коэффициента запаса и коэффициента электростатического использования, а также применение электростатического измерительного механизма в амперметре на весьма малые номинальные токи.

Приборы выпрямительной системы в работе не рассматриваются вследствие своего основного недостатка, заключающегося в недопустимо высоком влиянии искажения формы кривой как это было показано А. Я. Безикович.

Измерительные приборы электронной системы, получающие все более широкое распространение, отличаются целым рядом положительных качеств: широким частотным диапазоном, исключительно малым потреблением мощности из измерительной цепи и т. д. К сожалению, эти приборы весьма сложны и дороги, а точность их довольно низка. Однако, хотя в работе и не рассматриваются непосредственно вопросы разработки электронных приборов, тем не менее она может быть использована и в этом случае, поскольку измерительные механизмы имеющие широкий частотный диапазон, крайне необходимы в электронных приборах.

В работе показано, что наиболее перспективными электромеханическими системами, с точки зрения применимости в приборах для широкого диапазона частот, являются приборы электромагнитной, электродинамической и электростатической систем. Показано также, что дальнейшее расширение частотного диапазона, при одновременном снижении собственного потребления мощности, возможно только в том случае, если конструкции измерительных механизмов подвергнутся коренному усовершенствованию. В связи с необходимостью компенсации остаточных частотных погрешностей обращено внимание на необходимость разработки новых схем компенсации частотных погрешностей измерительных приборов, которые отличались бы большой универсальностью применения.

### Требования к конструкциям приборов электромагнитной и электродинамической систем, предназначенных для работы в широком диапазоне частот и условия их выполнения

Снижение собственного потребления мощности прибором может быть достигнуто путем уменьшения угла отклонения подвижной части и уменьшением вращающего момента. Однако, хотя эти общие положения известны давно, тем не менее реализация подобных рекомендаций оказалась возможной только после проведения большой серии теоретических и экспериментальных исследований.

Одним из главных является вопрос объективной оценки эксплуатационных свойств измерительного механизма. Наиболее целесообразным оказалось введение «коэффициента уравновешенности»

$$k_{ур} = \frac{W}{I_{пч}} \quad (1)$$

где:  $W$  — удельный устанавливающий момент,  
 $I_{пч}$  — момент инерции подвижной части.

В работе показано, что коэффициент уравновешенности, определенный из (1), является наиболее правильным критерием оценки эксплуатационных свойств как измерительного механизма, так и всего прибора в целом. Приведены предельно допустимые значения коэффициента уравновешенности, определенные из условий соответствия разрабатываемого прибора действующим стандартам.

Значительная работа была проведена в направлении установления целесообразной величины угла отклонения подвижной части. Доказано, что измерительный механизм с углом отклонения подвижной части меньшим  $0,1 \text{ рад}$  имеет недопустимо низкую стабильность показаний для прибора класса точности 0,5. Наиболее целесообразным является выбор угла отклонения в пределах  $0,12—0,25 \text{ рад}$ , т. к. это обеспечивает удовлетворительную стабильность с одной стороны и достаточно высокую чувствительность механизма с другой.

С целью создания возможности оценки измерительного механизма с точки зрения его электрических свойств введено понятие чувствительности:

$$\lambda = \frac{M_{вр}}{L_{\max} I_n^2} \quad (2)$$

где:  $M_{вр}$  — вращающий момент;

$L_{\max}$  — максимальная индуктивность измерительного механизма;

$I_n$  — ток в катушках механизма.

Чувствительность измерительного механизма определяется экспериментально и является величиной постоянной для данного механизма. Весьма удобно пользоваться понятием чувствительности при расчете приборов для заданного частотного диапазона.

Как показали исследования, одной из основных причин изменения показаний измерительного механизма при изменении частоты является воздействие вихревых токов в конструктивных деталях. В связи с этим необходимо принять меры к снижению этого воздействия, для чего необходимо широкое внедрение изоляционных конструктивных материалов, а в тех случаях, когда это невозможно, следует применять детали из сплавов с высоким удельным сопротивлением.

В работе описаны четыре разработанные конструкции измерительных механизмов, удовлетворяющие предъявляемым требованиям. Показано, что при разработке измерительных механизмов для частотного диапазона с верхней границей в несколько килогерц целесообразно отказаться от экранированных конструкций, а защиту от влияния внешних магнитных полей осуществлять методом астазирования.

Если при конструировании обычных измерительных механизмов стремятся сделать коэффициент электромагнитного использования возможно большим, то при разработке механизма, предназначенного для работы в широком диапазоне частот необходимо ограничиваться каким то максимальным значением этого коэффициента. В противном случае возможно возникновение значительных изменений показаний в различных точках шкалы. Однако, если максимальное значение коэффициента электромагнитного использования механизма вольтметра определить из выражения:

$$k_{эм} \leq \frac{0,144 K k_{\beta} \alpha r}{L_{\max}} 10^{-4} \quad (3)$$

где:  $K$  — класс точности прибора;

$k_{\beta}$  — коэффициент запаса;

$\alpha$  — отношение зашунтированной емкостью части добавочного сопротивления ко всему сопротивлению;

$r$  — активное сопротивление вольтметра, то можно быть уверенным в том, что изменение показаний в любой точке шкалы не превысит заданных значений.

Кроме рекомендации по рациональному конструированию измерительных механизмов в работе приведены соображения по

правильному выбору целого ряда других конструктивных элементов приборов для широкого диапазона частот.

### Глава III

#### Приборы для измерения напряжения

Исследования, проведенные целым рядом авторов (М. С. Кандер, В. Н. Мильштейном, М. А. Огорелиным и др.) показали, что обычные измерительные механизмы, отличающиеся значительным углом отклонения и большой величиной вращающего момента, вряд ли могут быть использованы в диапазоне частот выше 2—3 кГц. При этом главными причинами, снижающими верхнюю границу частотного диапазона, являются значительная индуктивность прибора и большая величина коэффициента электромагнитного использования. Однако, внедрение измерительных механизмов по типу, описанных в главе II, позволяет расширить частотный диапазон приборов в десятки раз, поскольку эти механизмы имеют резко сниженную величину собственной индуктивности, а их коэффициент электромагнитного использования не превосходит 1—2%.

Для целей компенсации частотных погрешностей вольтметра чаще всего применяется схема, в которой часть добавочного сопротивления шунтируется компенсирующей емкостью. Несмотря на то, что расчету этой схемы частотной компенсации уделялось много внимания, необходимо вновь вернуться к ней и рассмотреть ее работу с совершенно иной точки зрения. Дело в том, что, обычно, при расчете оптимальных условий компенсации принималось во внимание лишь изменение показаний прибора в номинальной области частот. При этом оказывается, что кривая частотных погрешностей падает весьма круто при повышении частоты выше частоты компенсации.

Действующие в настоящее время стандарты регламентируют уже не только изменение показаний в номинальной области частот, но и требуют, чтобы влияние гармонических составляющих в кривой измеряемого напряжения также находилось в определенных нормах. Подобные требования заставляют совершенно иначе подойти к расчету схемы частотной компенсации. При этом главным оказывается уже не изменение показаний в номинальной области частот, а ограничение влияния гармонических составляющих.

Ток полного отклонения некомпенсированного вольтметра может быть определен из выражения:

$$I_n = \frac{20\pi f_{\max} W a m \left(1 - \frac{k}{\eta} 10^{-2}\right)}{U_n \lambda \sqrt{2 \frac{K}{\eta} - \frac{K^2}{\eta^2} 10^{-2}}} \quad (4)$$

где:  $f_{\max}$  — верхняя граница рабочего диапазона частот;  
 $m$  — кратность гармонической составляющей;  
 $\eta$  — отношение амплитуды  $m$ -ой гармонической составляющей к первой;  
 $U_n$  — номинальное напряжение рассчитываемого вольтметра.

Выражение (4) может быть применено только в случае, когда собственная конструктивная погрешность измерительного механизма на частоте верхней границы рабочего диапазона пренебрежимо мала. В противном случае необходимо воспользоваться более сложным выражением:

$$I_n = \frac{20\pi f_{\max} W a m \left[1 - \frac{K}{\eta} 10^{-2} - \left(\frac{f_{\max}}{f_k}\right)^n 10^{-2}\right]}{U_n \lambda \sqrt{2 \frac{K}{\eta} - \frac{K^2}{\eta^2} 10^{-2} - 2 \left(\frac{f_{\max}}{f_k}\right)^n 10^{-2}}} \quad (5)$$

где:  $f_k$  — частота, при которой конструктивная погрешность измерительного механизма достигает значения—1%;  
 $n$  — показатель степени, характеризующий зависимость конструктивной погрешности от частоты.

Показатель  $n$  определяется из кривых конструктивных погрешностей измерительного механизма. Обычно он колеблется в пределах 1 ÷ 2.

Поскольку выражение (5) относится к некомпенсированному вольтметру, то, для перехода к прибору со схемой компенсации, в работе приведены соответствующие кривые, воспользовавшись которыми возможно легко определить величину тока полного отклонения компенсированного прибора. Чисто аналитические выражения в этом случае использовать не целесообразно, т. к. они совершенно не учитывают влияния конструктивной погрешности на величину результирующей. Кроме того, следует иметь в виду, что величина  $n$ , в (5) сама по себе не является постоянной даже для одного измерительного механизма.

Значение компенсирующей емкости может быть легко найдено из выражения:

$$C = \frac{L}{a^2 r^2 \left(1 + \frac{\sqrt{2a^2 r^2 - \omega^2 L^2}}{ar}\right)} \quad (6)$$

где:  $\alpha$  — отношение величины шунтированного емкостью сопротивления ко всему активному сопротивлению вольтметра;

$L$  — индуктивность измерительного механизма, а погрешность прибора в любой точке частотного диапазона

$$\gamma_f \approx \frac{\alpha^2 \omega^2 L^2 + \frac{L^2}{r^2 C^2} + \alpha^4 r^2 - 2\alpha^3 r^2 - 2 \frac{\alpha^2 L}{C}}{2\alpha^2 r^2 + 2 \frac{1}{\omega^2 C^2} + \alpha^2 \omega^2 L^2 + \frac{L^2}{r^2 C^2} + \alpha^4 r^2 - 2\alpha^3 r^2 - 2 \frac{\alpha^2 L}{C}} - \gamma_k \left( \frac{\omega}{\omega_k} \right)^n 10^{-2}. \quad (7)$$

В том случае, когда конструктивные частотные погрешности прибора малы, по сравнению со схемными, оказывается возможным производить расчет всех данных компенсированного прибора чисто аналитическим путем, как это показано в работе.

При испытании измерительных приборов на влияние искажения формы кривой, в целом ряде случаев возникают неоправданно высокие значения этих влияний. В работе на это обращено внимание и показано, что источником погрешностей в этом случае может быть не испытуемый прибор, а источник питания. Показана возможность снижения этих влияний до необходимого минимума.

Анализ работы схемы расширения диапазона измеряемых напряжений при помощи включения добавочного калиброванного сопротивления, показал, что в этом случае возможны значительные погрешности измерений, причем максимальная погрешность может быть определена из:

$$\gamma_{\text{изм}} \% \leq 2K_B - \frac{(D-1)K_{\text{дс}} + K_B}{D}, \quad (8)$$

где:  $K_B$  — класс точности вольтметра;

$K_{\text{дс}}$  — класс точности добавочного сопротивления;

$D$  — коэффициент расширения диапазона измеряемых напряжений.

На указанное явление автором было обращено внимание в процессе переработки стандартов, в связи с чем в настоящее время повышены требования к точности подгонки величины сопротивления вольтметра в том случае, когда он предназначен для работы в комплекте с добавочным сопротивлением. При этом максимально возможная погрешность может быть определена из:

$$\gamma_{\text{изм}} \% \leq 1,5 K_B - \frac{(D-1)K_{\text{дс}} + 0,5K_B}{D} \quad (9)$$

Для расширения диапазона измеряемых электростатическим вольтметром напряжений часто применяются емкостные делители, причем одним из конденсаторов делителя является сам измерительный прибор. Однако, в этом случае возникают погрешности вследствие непостоянства коэффициента деления при различных измеряемых напряжениях. С целью снижения возможных погрешностей до допустимого значения необходимо, чтобы коэффициент электростатического использования

$$k_{\text{эс}} \leq 0,04 \frac{DK_B k_B}{D-1}. \quad (10)$$

В том случае, когда это неравенство не выполняется, необходимо шунтировать измерительный прибор дополнительной емкостью, которую легко определить из (10) при известной емкости прибора.

## Глава IV

### Приборы для измерения тока

Основной причиной, ограничивающей верхнюю границу рабочего диапазона частот амперметров является то, что применяющиеся измерительные механизмы, на основе которых проектируются приборы, имеют довольно значительную зависимость вращающего момента от частоты. Кроме того, источником погрешностей служит схема прибора (особенно в амперметрах на большие значения тока). Причиной, ограничивающей диапазон частотной применимости, является также значительное собственное потребление мощности прибором.

Расширение частотного диапазона амперметров может быть достигнуто при разработке их на базе измерительных механизмов, конструкции которых описаны в главе II. При этом особенно перспективной является конструкция электродинамического механизма.

В связи с необходимостью компенсации конструктивных и схемных частотных погрешностей, в работе приведены соответствующие рекомендации. Показано, что при компенсации частотных погрешностей при помощи обычно применяемой схемы с емкостью, значение последней целесообразно выбирать по условию одновременного снижения до минимума двух составляющих: составляющей, обусловленной влиянием тока взаимо-

индуктивности и составляющей, являющейся следствием изменения коэффициента шунтирования.

В работе показано, что в приборах с малым углом отклонения и повышенной чувствительностью, основной составляющей частотной погрешности является составляющая, обусловленная изменением коэффициента шунтирования. Вследствие этого целесообразно введение схемы компенсации при помощи комплексного шунта. Даны рекомендации по выбору элементов шунта и показано, что в этом случае изменения показаний прибора можно вычислить из:

$$\gamma_f = 0,176 \frac{k_{эм} (L_{нк} + L_p + L_k) (L_p + L_k) (r_2 + r_p) \sqrt{\beta} \sin \psi \cos (\vartheta_0 + \beta)}{r_1 \left[ \left( \frac{r_1 + r_2 + r_p}{\omega} \right)^2 + (L_p + L_k)^2 \right] \sqrt{\beta_n (1 - \cos \beta_n)} \sin \beta_n} \quad (11)$$

где:  $L_{нк}$ ,  $L_p$ ,  $L_k$  — индуктивности неподвижных катушек, подвижной части и шунта соответственно;

$r_1$ ,  $r_p$ ,  $r_2$  — активные сопротивления шунта, подвижной части и сопротивления в цепи подвижной части соответственно;

$\beta$  — угол отклонения подвижной части;

$\beta_n$  — полный угол отклонения подвижной части;

$\vartheta_0$  — начальный угол установки подвижной части.

В выражении (11) значение  $\psi$  может быть вычислено из:

$$\psi = \arctg \frac{\omega (L_p + L_k)}{r_1 + r_2 + r_p} \quad (12)$$

Из приведенного в работе сопоставления абсолютных значений изменения показаний прибора при компенсации по схеме с емкостью и по схеме с комплексным шунтом, становится очевидной целесообразность использования последнего метода компенсации в электродинамических приборах с малым углом отклонения.

Анализ условий работы амперметра показывает, что наименьшие влияния изменения частоты на показания прибора имеют место при выборе начального угла подвижной части их условия;

$$\vartheta_0 = \arcsin \frac{1,33 \left( \frac{\pi}{2} - \vartheta_0 \right)}{\beta_n} \approx \frac{\pi}{2} - 0,75 \beta_n \quad (13)$$

В связи с тем, что до настоящего времени схемы компенса-

ции частотных влияний не применялись при разработке электромагнитных амперметров и электродинамических амперметров на малые токи, в работе предложен ряд новых схем компенсации. Анализ и экспериментальная проверка показывают большую ценность этих схем, тем более, что они учитывают частотные влияния, обусловленные конструкцией измерительного механизма. В работе проведены рекомендации по применению схем компенсации и даны аналитические зависимости между величинами элементов компенсирующих цепочек и остальными характеристиками приборов.

Во многих случаях возникает необходимость в многопредельных переносных приборах, показания которых не зависят от наличия гармонических составляющих в кривой измеряемого тока или напряжения. Эту задачу можно решить путем разработки электромагнитных измерительных механизмов повышенной чувствительности. Рекомендации, приведенные в реферируемой работе, позволяют производить разработку универсальных многопредельных приборов электромагнитной системы с соотношением пределов измерения по току, достигающим до 6000. Серийное производство одного из приборов, разработанного с учетом рекомендаций, полностью подтверждает правильность их.

Приборы электромагнитной и электродинамической систем не могут быть выполнены для широкого диапазона частот на номинальные токи, меньше 10 ма, вследствие значительных влияний собственной емкости обмотки. По этой причине в работе предлагается производить разработку амперметров на токи, меньше 10 ма, на базе электростатического измерительного механизма, рассчитанного на низкие напряжения полного отклонения. Показано, что применение специальных безреактивных микропроводочных сопротивлений, в сочетании с предлагаемыми схемами частотной компенсации, позволяет выполнять приборы высоких классов точности на номинальные токи, вплоть до 100 мка. Проведена теоретическая и экспериментальная проверка предлагаемого решения.

## Глава V

### Приборы для измерения мощности и энергии

Измерительный механизм электродинамической конструкции описанный в главе II, является единственно пригодным для целей разработки на его базе ваттметров высоких классов точности для широкого диапазона частот. Тем не менее, даже при использовании этого весьма совершенного механизма, в ваттмет-

рах возникает целый ряд проблем, решение которых совершенно необходимо при разработке реальных приборов.

К этим проблемам относится, в частности, необходимость снижения до приемлемого значения электростатического взаимодействия между подвижной частью прибора и неподвижными элементами. В работе содержатся рекомендации, выполнение которых уменьшает указанное влияние до пренебрежимо малых величин.

При работе в диапазоне повышенных частот приходится сталкиваться не только с фазовыми составляющими частотных погрешностей ваттметров, но и с амплитудными, что является следствием влияния собственных емкостей катушек и вихревых токов в материале отдельных деталей. Весьма часто, компенсация фазовых составляющих по известным схемам не позволяет свести до минимума амплитудные влияния. В связи с этим в работе предложен и проанализирован ряд схем компенсации амплитудных составляющих частотных погрешностей ваттметров. При этом оказывается возможным производить компенсацию фазовых и амплитудных составляющих практически независимо друг от друга. Кроме того, предложенные схемы позволяют производить компенсацию отдельных составляющих частотных погрешностей независимо от сочетания их знаков.

Показана возможность определения угла фазовой некомпенсации прибора при неточной фиксации прямого угла между векторами тока и напряжения. Показана также возможность точного измерения угла между векторами тока и напряжения, при его приближении к прямому, при помощи компенсируемого прибора. В этом случае

$$\varphi = 0,5 \left( \pi - \frac{\beta_+ + \beta_-}{\beta_n \cos \varphi_{ном}} \right) \quad (14)$$

и

$$\operatorname{tg} \delta \approx \delta = \frac{\beta_+ - \beta_-}{2 \beta_n \cos \varphi_{ном}} \quad (15)$$

где:  $\varphi$  — угол между векторами тока и напряжения;

$\delta$  — угол фазовой компенсации ваттметра;

$\cos \varphi_{ном}$  — номинальный коэффициент мощности ваттметра;

$\beta_+$  — отклонение указателя ваттметра с нулевой отметки при положении переключателя «+»;

$\beta_-$  — то же, но при положении переключателя «-».

Приведенная методика определения угла некомпенсации и фазового угла имеет весьма большую ценность, если учесть, что ее точность всегда достаточна (поскольку определение углов

производится по испытываемому прибору). Кроме того, при таком определении углов отпадает необходимость в образцовой аппаратуре высокой точности.

При измерениях мощности на переменном токе, в ряде случаев, возникает возможность получения весьма значительных погрешностей, намного превышающих допустимые классом точности примененных приборов. На эту особенность измерений в цепях переменного тока обращено внимание и даны соответствующие рекомендации по снижению возможных погрешностей.

В работе показано, что при измерении мощности результаты измерений могут содержать значительные погрешности, вследствие влияния собственного потребления мощности ваттметром. Показано также, что даже при учете собственного потребления мощности, погрешность вследствие недостаточной достоверности сведений о сопротивлении последовательной цепи, может достигать значений намного превышающих погрешность, обусловленную классом точности. Приведены рекомендации по снижению до необходимого минимума погрешностей, возникающих вследствие влияния собственного потребления мощности прибором.

Анализ работы счетчиков индукционной системы, получивших широкое распространение, показывает, что они имеют недопустимо высокие значения погрешностей, обусловленных наличием гармонических составляющих в кривых тока и напряжения. Вследствие этого, в настоящее время, весьма актуальной является задача создания измерителей энергии, не имеющих погрешностей от искаженности формы кривой. Можно наметить два пути решения проблемы: создание электродинамических счетчиков и разработка преобразователей мощности в постоянный ток (при дальнейшем интегрировании последнего).

Электродинамические счетчики имеют довольно низкие надежность и точность, что обусловлено наличием трущихся частей. Однако, дальнейшее усовершенствование их, повидимому, приведет к созданию вполне приемлемых для практических целей конструкций. С другой стороны, преобразователи мощности в постоянный ток обладают целым рядом положительных сторон, из которых главным является отсутствие трущихся частей, т. е. надежность, долговечность и высокая точность.

С целью проверки указанного положения был разработан, описанный в работе автоматический электродинамический преобразователь (АДП), испытания которого показали, что он обладает весьма высокими техническими характеристиками.

АДП состоит из двух отдельных блоков: первый является собственно преобразователем, а второй содержит электронную часть. Сравнение входной мощности и пропорционального ей выходного тока производится на электродинамическом измери-



тельном механизме с тремя неподвижными обмотками и одной подвижной. При этом первая неподвижная обмотка служит последовательной обмоткой ваттметра, вторая — питается стабилизированным постоянным током, а по третьей обмотке протекает ток частотой 10 кГц. Назначение второй обмотки — создание противодействующего момента, а третья обмотка работает в схеме датчика угла поворота подвижной части. Подвижная часть прибора через специальные фильтры включена в три различные цепи: цепь ваттметра, цепь датчика угла поворота и цепь противодействующего момента.

При включении ваттметра возникает вращающий момент, стремящийся повернуть подвижную катушку, вследствие чего в ее витках начинает наводиться сигнал с частотой 10 кГц от катушки датчика угла поворота. Этот сигнал усиливается и подается на диагональ фазочувствительного моста, на вторую диагональ которого подан сигнал, пропорциональный току в неподвижной катушке датчика угла поворота. В результате этого на выходе возникает постоянный ток, пропорциональный углу поворота подвижной части. Часть этого тока подается обратно в цепь подвижной катушки, что приводит к возвращению подвижной части в положение, близкое к первоначальному. Вторая часть выходного тока с моста подается на нагрузку и служит выходным сигналом.

Испытания макета АДП показали, что он обладает весьма высокими техническими характеристиками. Приведенная точность преобразования не хуже 0,6% во всем диапазоне измеряемых мощностей, а время успокоения в худшем случае не превышает 1,5 сек. Подобный преобразователь может быть с успехом использован для измерений мощности и энергии не только в цепях с искаженной формой кривой, но также и при повышенной частоте. Кроме того, точность его может быть доведена до весьма высокого значения.

### Заключение

Исходя из изложенных в работе теоретических положений, результатов экспериментальных исследований отдельных узлов и приборов в целом, а также принимая во внимание результаты заводских и Государственных испытаний приборов, изготовленных с учетом материалов, изложенных в реферируемой диссертации, можно сделать следующие основные выводы:

1. При разработке электроизмерительных приборов повышенных классов точности, предназначенных для диапазона звуковых частот, целесообразно использовать измерительные механизмы электродинамической, электромагнитной и электроста-

тической систем. При правильном конструктивном выполнении эти механизмы позволяют решить поставленную задачу весьма простыми средствами. В работе приведены обоснованные рекомендации по рациональному выбору основных конструктивных характеристик приборов, исходя из необходимости получения заданных результатов.

2. Предложенный метод расчета вольтметров по заданному классу точности, частотному диапазону, чувствительности измерительного механизма, при учете собственных конструктивных погрешностей, весьма прост и удобен для практического применения при достаточно высокой точности результатов. Обращено внимание на необходимость обязательного учета, при расчете прибора, влияния гармонических составляющих.

3. В работе показано, что в электродинамических амперметрах со сложной схемой при малых значениях угла отклонения погрешность от взаимоиндуктивности настолько мала, что частотные погрешности целесообразно компенсировать введением индуктивности в цепь шунта, что ведет к значительному расширению частотного диапазона. Приведены и проанализированы новые схемы компенсации, позволяющие расширить в несколько раз частотный диапазон не только электродинамических амперметров, но и электромагнитных, для которых схемы компенсации до настоящего времени не применялись.

4. Предложена схема электростатического амперметра с частотной компенсацией, позволяющая выполнить приборы на малые значения тока при высокой точности измерений в звуковом диапазоне частот.

5. Проведен анализ работы вольтметров различных систем при расширении диапазона измеряемых напряжений с помощью добавочных сопротивлений и емкостных делителей. Указаны источники дополнительных погрешностей и меры их снижения.

6. Вскрыты источники не только фазовых, но и амплитудных составляющих частотных погрешностей ваттметров, проанализированы и предложены схемы для компенсации этих погрешностей. Показана возможность получения значительных погрешностей при измерении мощности в цепях переменного тока вследствие невозможности учета ряда влияющих факторов. Даны рекомендации по правильному применению приборов.

7. В связи с невозможностью применения индукционных счетчиков в цепях с значительно искаженной формой кривых тока и напряжения показана целесообразность применения специальных преобразователей мощности в постоянный ток. Предложена блок-схема подобного преобразователя, разработаны конструкция и принципиальная схема и выполнен макет, показавший весьма хорошие результаты при испытании.

8. Результаты исследований, положенные в основу реферированной диссертации, были использованы при разработке ряда электроизмерительных приборов, отличающихся значительно расширенным рабочим диапазоном частот при одновременно сниженном собственном потреблении мощности. Все разработанные приборы полностью соответствуют действующим стандартам. Часть из разработанных приборов находится в серийном производстве, часть — в опытно-промышленной эксплуатации.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Скрябинский В. С., Ваттметры для измерения потерь в ферромагнитных материалах. Сб. «Исследование схем и аппаратуры для магнитных и электрических измерений». Изд. «Наукова думка», Киев, 1964.

2. Скрябинский В. С., Власенко Г. В., Ваттметр типа Д542. Вестник электропромышленности, № 12, 1960.

3. Скрябинский В. С., Новый метод компенсации частотных погрешностей амперметров. Автоматика и приборостроение, № 1, 1961.

4. Скрябинский В. С., Компенсация частотных погрешностей ваттметров. Сб. «Новые научно-исследовательские работы по метрологии», № 6. Изд. стандартов, М., 1964.

5. Скрябинский В. С., Погрешность измерения мощности в цепях переменного тока. Измерительная техника № 12, 1960.

6. Скрябинский В. С., Расчет погрешности вольтметров с добавочными сопротивлениями. Приборостроение № 2, 1960.

7. Скрябинский В. С., Установка для стабилизации частоты электромашинных генераторов переменного тока. Энергетика и электротехническая промышленность № 2, 1960.

8. Скрябинский В. С., Электрический измерительный прибор. Авторское свидетельство № 143140 с приоритетом от 8 июня 1960.

9. Скрябинский В. С., Приборы высоких классов точности, предназначенные для испытания выпрямительных приборов в широком диапазоне частот. Сб. «Вопросы расчета, конструирования и технологии транзисторных, выпрямительных, магнитоэлектрических электроизмерительных приборов», ОНТИ прибор, М., 1964, вып. XI.

10. Скрябинский В. С., Электромагнитный измерительный прибор. Авторское свидетельство № 138662 с приоритетом от 21 ноября 1960.

Основные результаты работы были доложены на:

Всесоюзной конференции по измерению мощности. г. Ленинград 1962 г.

Всесоюзном совещании «Перспективы развития комбинированных (универсальных) электроизмерительных приборов», г. Житомир, март 1963 г.

II Всесоюзной конференции по микропроводу и приборам сопротивления. г. Кишинев, октябрь 1963 г.